

Partie 6

Intitulé du Cours en ligne :
Traitement thermique (T.T)

Destiné aux Etudiants du Master I

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Génie des Matériaux

Présenté par :

Dr. HABIBI Samir

Traitement thermique (T.T)

Sommaire

Partie 1. Concept de traitement thermique (Définition, Objectifs, Paramètres clés liés au T.T)

Partie 2. Propriétés des matériaux

Partie 3. Différents types de fours et les traitements associés

Partie 4. Défauts des pièces et mesures à prendre lors du traitement thermique

Partie 5. Classification des catégories des T.T

Partie 6. Traitement thermique dans la masse

- 6.1 Procédé thermique par la Trempe

- 6.2 Procédé thermique par le Recuit

- 6.3 Procédé thermique par le Revenu

Partie 7. Traitement thermique superficiel

- 7.1 Chauffage oxyacétylène (OA)

- 7.2 Chauffage par induction

- 7.3 Techniques haute énergie

Partie 8. Traitement thermochimique de diffusion

- 8.1 La cémentation

- 8.2 La nitruration,

- 8.3 La carbonitruration

- 8.4 La chromisation

Partie 9. Etude du diagramme temps-température- taux de transformation

Partie 10. Observations micrographiques et caractéristiques physiques et mécaniques

Partie 11. Analyse des trois types de traitement thermique appliqués aux aciers

Partie 12. Prédire et prévoir le comportement du matériau (acier) sous l'effet du T.T

Partie 6. Traitement thermique dans la masse

Le traitement thermique dans la masse d'un matériau est un traitement thermique qui affecte tout ce matériau et non uniquement sa zone superficielle comme c'est le cas d'un traitement thermique superficiel.

Les principaux traitements dans la masse en bref sont⁵:

Recuit :

Qui est caractérisé par l'évolution vers l'état d'équilibre le plus stable et un chauffage suivi d'un refroidissement lent.

Trempe:

Qui est caractérisé par l'évolution vers un état hors d'équilibre, instable ou métastable avec un Refroidissement rapide.

Revenu:

Qui est caractérisé par l'évolution à partir d'un état hors d'équilibre comportant des phases métastables, vers un état d'équilibre plus ou moins complet, accompagné d'un processus de chauffage lent suivi d'un refroidissement lent.

Le revenu succède généralement à une trempe et le stade ultime du revenu est l'état recuit.

6.1 Procédé thermique par la Trempe

La trempe est principalement un procédé de traitement des métaux et du verre à l'état solide.

La trempe peut être thermique (chauffage suivi d'un refroidissement rapide) ou chimique (immersion dans un bain de sel fondu), il peut aussi être dans la masse du matériau ou uniquement à sa surface :

La trempe désigne une opération qui consiste à refroidir brusquement un matériau porté à une température prédéfinie pendant suffisamment longtemps, en l'immergeant dans un liquide (huile, etc.) afin d'en améliorer ses propriétés.

La trempe est un traitement thermique qui comprend :

- Le chauffage du métal à une température supérieure au point de transformation.
- Le maintien isotherme pour permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse.
- Le refroidissement rapide a lieu par immersion des pièces dans un fluide.

6.1.1 Milieu de trempe

Trempe à l'eau tempérée soit une vitesse de refroidissement rapide.

Trempe à l'huile soit une vitesse moins grande (et moins de défauts).

6.1.2 Les défauts

Les déformations engendrées.

Les tapures dues à la dilatation de la transformation martensitique.

6.1.3 La modification des propriétés issue de la trempe

- La résistance à la rupture R_r tend vers la hausse.
- La contrainte à la limite élastique R_e tend vers la hausse.
- La dureté H_B tend vers la hausse.
- L'allongement A% tend vers la baisse.
- La résilience K tend vers la baisse.

Comme exemple on examine l'évolution des propriétés mécaniques étudiées $R_r, R_e, H_B, A\%, K$ suite à une opération de trempe appliquée sur deux aciers à savoir l'acier doux et l'acier demi-dur comme montré sur le tableau suivant :

Tableau I. La variabilité paramétrique issue d'opération de trempe classique.

Désignation	Etat	(Rr)e N/mm ²	(Re) N/mm ²	HB (N/mm ²)	A%	K (j/cm ²)
Acier doux 0.10 à 0.14% de C	-naturel	370	300	1080	38	340
	-trempé à l'eau	500	350	1460	32	320
Acier demi-dur 0.4 à 0.5% de C	-naturel	650	400	1900	18	120
	-trempé à l'eau	1900	1600	5600	2	10

6.1.4 Les types de trempe

6.1.4.1 Trempe de masse

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite.

6.1.4.2 Trempe superficielle ou localisée

C'est obtenir une grande dureté en surface tout en conservant un bon allongement dans la zone sous-jacente jusqu'au centre de la section. Elle consiste à chauffer (ou par induction ou à la flamme) localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante. Le refroidissement s'effectue le plus souvent par jet d'eau sous pression.

6.2 Procédé thermique par le Recuit

Le recuit d'une pièce métallique ou d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé. Cette procédure, courante en sciences des matériaux, permet de modifier les caractéristiques physiques du métal ou du matériau étudié. Cette action est particulièrement employée pour faciliter la relaxation des contraintes pouvant s'accumuler au cœur de la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de synthèse et de mise en forme des matériaux. À l'occasion d'un recuit, les grains (mono-cristaux) de matière se reforment et retrouvent en quelque sorte, leur « état d'équilibre ».

Le recuit est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce.

Le recuit de cristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage...).

6.2.1 Nécessité du recuit en métallurgie

Le laminage à froid d'un matériau provoque son écrouissage ce qui se traduit par une perte de ductilité (propriété d'un matériau à s'étirer sans se rompre) et un durcissement. Une restructuration de texture granulaire est alors nécessaire pour lui redonner les propriétés mécaniques sensiblement identiques à celles qu'il avait avant déformation.

6.2.2 Exemples d'utilisation du recuit

Adaptation de la taille des grains du métal pour des performances optimales (après une coulée) ;

Élimination de contraintes résiduelles (déformation plastique) ;

Baisse de la dureté en vue d'un usinage ;

Obtention de pièces mono-cristallines de caractéristiques exceptionnelles (ex: aubes de rotors de turbo-machines)...

6.2.3 Procédé

Le recuit est obtenu par élévation de température du métal à des températures allant de 500 °C à 850 °C. La qualité du recuit exige un cycle de chauffe (temps de montée en température, temps de maintien) bien maîtrisé (il peut être lent ou rapide).

Il est nécessaire de respecter certaines valeurs couplées de temps de maintien et de température de chauffe pour avoir une recristallisation complète.

La vitesse de chauffe influence la taille des grains (et leur nombre). En fonction de la structure d'origine et de la taille de grain souhaitée, il faudra être plus ou moins rapide. Le temps de maintien, la température de chauffe et la vitesse de refroidissement influencent plus encore la taille des grains.

Plus la descente est rapide (sans atteindre des vitesses de trempe), plus les grains restent petits.

Si une trempe est souhaitée, elle peut être réalisée en lieu et place du refroidissement du recuit.

6.2.3 Cycle lent et cycle rapide

Le cycle lent de recuit d'un acier est effectué en plaçant les bobines sous des cloches pendant 30 à 40 heures. Le recuit continu permet quant à lui un cycle de chauffage rapide (90 secondes + ou - 30 secondes). l'étape de refroidissement doit être aussi lente. Par exemple, les fours à cloche de type HICO/H2 utilisent à la fin du cycle de

chauffage un refroidisseur qui commence par un refroidissement à air, jusqu'à une température de 300 °C, suivi par un arrosage à l'eau jusqu'à une température de 70 °C.

6.2.4 Intérêt du recuit continu

Apparu dans les années 1960, le recuit continu permet de réunir sur une ligne en continu les opérations de recuit, d'écrouissage, inspection, huilage, marquage, cisailage de rives et bobinage. Il permet un important gain de temps par rapport au recuit sous cloches (appelé aussi recuit de base).

6.2.5 Types de recuit

Il existe des nuances même de ces types de recuits, ce qui fait que l'on rencontrera d'autres dénominations. Ces quatre familles étant déterminées en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre

6.2.5.1 Le recuit d'adoucissement: Ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à A_1+80) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine.

6.2.5.2 Recuit de normalisation: Le recuit de normalisation a pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes. Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes :

-Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit AC_3+50° pour les aciers hypoeutectoides et $AcCm+50^\circ$ pour les aciers hypereutectoides.

-Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.

-Refroidissement en général à l'air calme. Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de A_3 suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage (Voir ci-dessous).

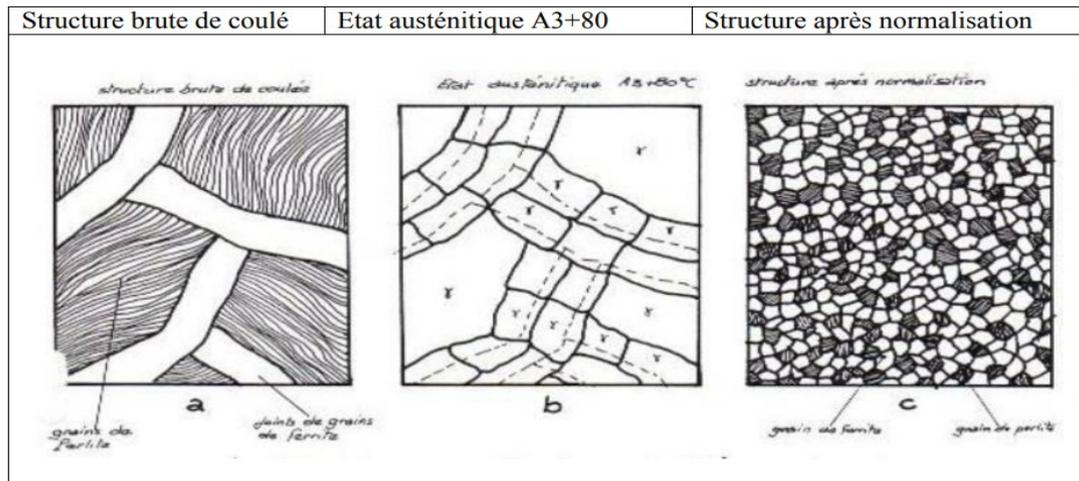


Fig. 7. Transformations de phases induites par T.T

Chaque transformation entraînant une recristallisation et un affinage du grain.

Les vitesses de chauffage et de refroidissement sont importantes, plus elles sont grandes, plus le grain est fin.

6.2.5.3 Le recuit de détente : on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à A1. Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques. Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier.

6.2.5.4 Le recuit d'homogénéisation ou de diffusion: Le recuit d'homogénéisation est appliqué pour remédier à ce phénomène d'hétérogénéité. Il est caractérisé essentiellement par une diffusion accélérée des éléments dans la structure utilisant notamment une température élevée durant un temps prolongé. Il consiste en pratique aux opérations suivantes :

- Chauffage de la pièce avec une vitesse qui doit respecter l'état de l'acier (sa composition chimique, sa conductibilité thermique, sa forme et ses dimensions). La température du traitement doit être de son côté suffisamment élevée du domaine austénitique pour accélérer le processus de diffusion des éléments dans la structure de

l'austénite. Elle est fixée à ($AC3 + 200^\circ$) et $AcCm + 200^\circ$) respectivement pour les aciers hypoeutectoides et les aciers hypereutectoides.

- Maintien prolongé à cette température. Le temps est calculé à l'aide des lois de la diffusion selon la nature des éléments d'alliages et les dimensions de la pièce.
- Refroidissement à vitesse lente. A la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains.

6.3 Procédé thermique par le Revenu

Les traitements thermiques dits de revenu font partie d'une famille de traitements thermiques ayant pour trait commun d'être toujours effectués à des températures inférieures aux températures de transformations allotropiques des métaux, lorsque celles-ci existent.

Le revenu est un traitement thermique qui ne s'applique qu'aux métaux préalablement trempés. Le revenu a pour but de diminuer les effets de la trempe et d'atténuer les tensions internes, en partie responsables de la fragilité du matériau trempé, en diminuant très peu la dureté.

Les revenus ont la particularité de produire deux effets :

- Une transformation métallurgique rendue possible par le mécanisme de diffusion amorcé pendant un séjour suffisant à température (voir Diagramme temps-température-transformation) ;
- Un abaissement de la limite d'élasticité et, de moindre façon, du module d'élasticité pendant la montée en température et une légère amorce de fluage pendant le temps de palier à température de revenu.

Selon l'état initial du matériau et sa composition chimique, l'un des effets prédomine aussi, selon ce qui est recherché, le revenu sera soit métallurgique, soit de dimensionnement. Cependant, quel que soit l'effet recherché, les deux effets se produiront et l'effet non recherché pourra avoir des conséquences non négligeables sur l'intégrité de la pièce traitée. Ceci est d'autant plus vrai si le traitement est effectué sur

une construction soudée (effet de sur-revenu dans la zone thermiquement affectée des soudures par exemple).

D'une manière générale, pour tenir compte des deux effets produits, les traitements de revenu effectués sur les constructions soudées prennent le nom de traitement thermique après soudage (TTAS), en anglais Post Weld Heat Treatment (PWHT).

On recommande de :

Procéder à la qualification du mode opératoire de traitement thermique avant de procéder sur pièce réelle ;

Réaliser un témoin de fabrication pour vérifier le succès de l'opération et valider le mode opératoire de traitement thermique.

6.3.1 La modification des propriétés issue de la trempe

Le revenu tend à ramener la pièce en acier par exemple trempée vers un état d'équilibre en provoquant la précipitation des carbones initialement en solution dans la martensite. La structure obtenue est la sorbite constituée de fines particules globulaires Fe_3C dispersées dans la ferrite. La sorbite possède une bonne résilience et de dureté HB 250 à 400.

- La résistance à la rupture R_r tend vers la baisse.
- La contrainte à la limite élastique R_e tend vers la baisse.
- La dureté H_B tend vers la baisse.
- L'allongement A% tend vers la hausse.
- La résilience K tend vers la hausse.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de TR et tR permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

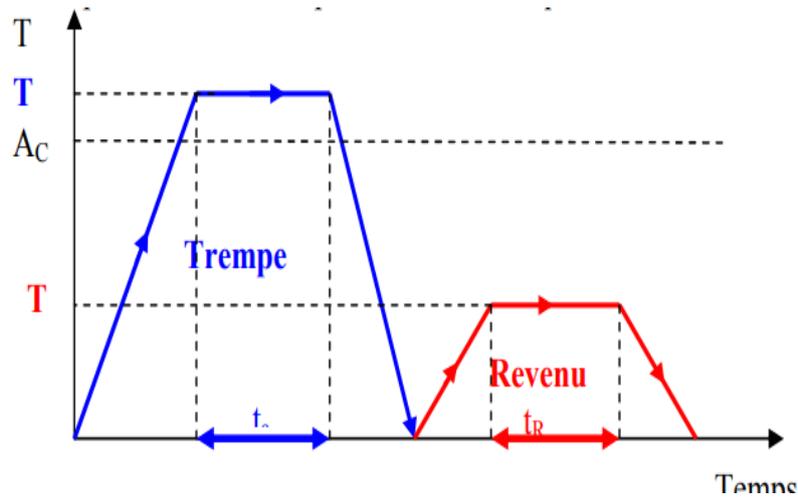


Fig. 8. Cycle complet (trempe, revenu)

6.3.2 Différents types de revenu

6.3.2.1 Revenu de relaxation ou de détente: Il s'effectue entre 180°C et 220°C - 250°C . Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite \diamond martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle...

6.3.2.2 Revenu de structure ou classique : Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques K , A et Z et une diminution plus importante de H , R_m et R_e . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

6.3.2.3 Revenu de durcissement: Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).

6.3.3 Cas des aciers

Pour les pièces en acier trempé ou auto-trempant (c'est-à-dire pouvant prendre la trempe pendant le soudage - cas des aciers alliés au chrome par exemple), le revenu permet d'adoucir les effets de la trempe en produisant la martensite dite revenue sans trop altérer (choix judicieux de la température de revenu) les effets fondamentaux de la trempe.

Pour les aciers n'étant pas particulièrement résistants à chaud, il permet un détensionnement des contraintes par adaptation plastique (ainsi qu'un dégazage de l'hydrogène dissous lors du soudage par exemple), participe à la stabilisation dimensionnelle (certaines pièces de précision doivent parfois subir un détensionnement de contraintes avant un usinage) et améliore la résistance à la fissuration à froid.

Lorsque le TTAS est effectué pour agir sur l'état métallurgique du matériau (cas d'un acier allié au chrome, 15CrMo4 ou 12CrMo10 par exemple), les étapes clefs sont :

Chauffage à température de 300 °C environ puis palier d'homogénéisation ;

Montée contrôlée jusqu'à la température de début de transformation souhaitée (température de revenu) ;

Maintien à température pendant le temps nécessaire à la transformation métallurgique de toute la masse chauffée ;

Refroidissement contrôlé jusqu'à la température de 300 °C environ.

Lorsque le TTAS est effectué en vue d'un détensionnement de contrainte ou d'une stabilisation dimensionnelle (acier de construction), les étapes clefs sont :

Chauffage à température de 300 °C environ puis palier d'homogénéisation ;

Montée contrôlée jusqu'à la température de détensionnement (un palier de température est parfois nécessaire pour assurer que la masse chauffée a atteint cette température en tous points) ;

Refroidissement contrôlé jusqu'à la température de 300 °C environ.

Dans tous les cas il est important d'établir le mode opératoire de traitement sur les conditions spécifiques de TTAS du matériau validées par l'aciériste.

6.3.4 Cas des alliages d'aluminium

Pour les pièces en alliage d'aluminium, le traitement de revenu durcit la pièce par précipitation de composés intermétalliques dans la matrice aluminium.

Il s'effectue, lui aussi, à une température nettement inférieure à celle de la trempe et est suivi d'un refroidissement naturel.

Exemple (les températures et durées varient d'un alliage à l'autre) : alliage de fonderie EN AC-42200 (ancienne désignation AS7G06) :

Mise en solution : 8 à 12 heures à 535 °C ;

Trempe à l'eau (20 °C) dans les 7 secondes qui suivent la sortie du four de mise en solution;

Revenu : 6 heures minimum à 170 °C.

Pour certains alliages, on effectue une trempe, mais pas de revenu. Dans ce cas, il y a « maturation » (exemple : 5 jours à 20 °C pour les AU), c'est-à-dire que l'on considère que l'alliage atteint ses caractéristiques mécaniques seulement après cette période. Tout essai de dureté ou de résistance mécanique avant ces 5 jours n'est pas significatif.

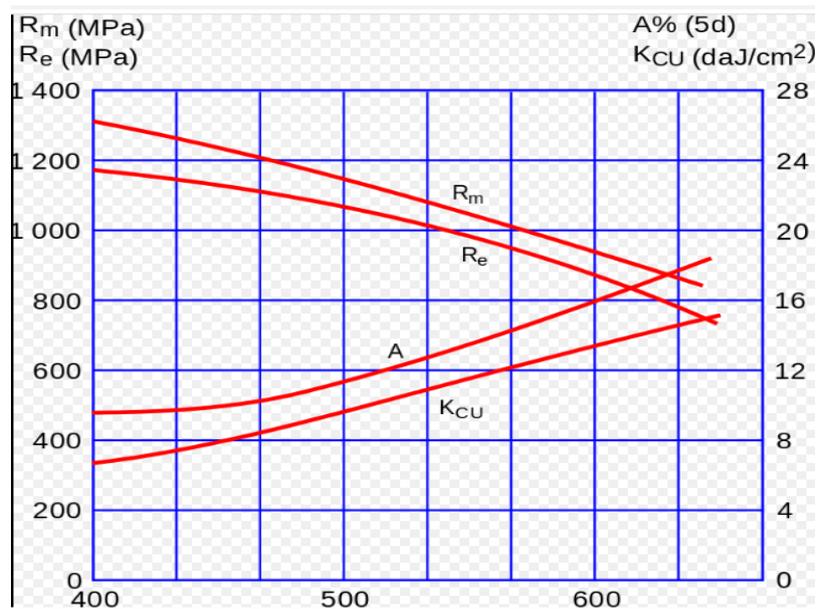


Fig. 9. Courbe de revenu (1 à 3 h) après pour l'acier 25CrMo4 (25CD4) après trempe à l'huile (835-865 °C).

Références

- [1] Jean-Marie Georges, Frottement, usure et lubrification: tribologie ou science des surfaces, Paris, Eyrolles, 2000, 424 p. (ISBN 2-212-05823-3).
- [2] <https://www.unifonds.fr/fabrication/traitement-thermique/>
- [3] Dominique Ghiglione, Claude Leroux et Christian Tournier, « Pratique des traitements thermo-chimiques », Éditions techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques.
- [4] [<https://bruval.ch/fr/construction-mecanique/traitement-thermique/>]
- [5] Michel Dupeux, « Aide-mémoire de science des matériaux », Dunod, 2005.
- [6] Sidney H. Avner, Introduction à la métallurgie physique, Centre collégial de développement de matériel didactique, p. 281.
- [7] R. Fayolle et B. Courtois, Ateliers de traitement thermique — Hygiène et sécurité, INRS, 2001.
- [8] J. Barralis et G. Maeder, Précis de métallurgie — Élaboration, structures-propriétés et normalisation, Nathan/Afnor, 1991 (ISBN 2-09-194017-8), p. 70-104, 125-127.